

**Zeitschrift:** Schweizer Ingenieur und Architekt  
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine  
**Band:** 101 (1983)  
**Heft:** 9

**Artikel:** Regelungstechnik in der Mechanik: Anwendung auf Magnetlager  
**Autor:** Schweitzer, Gerhard  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-75088>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 01.04.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

Angewandte Mechanik in Industrie und Hochschule IV\*

# Regelungstechnik in der Mechanik: Anwendung auf Magnetlager

Von Gerhard Schweitzer, Zürich

Die Aufgabe, das dynamische Verhalten einer mechanischen Struktur in einer ganz bestimmten Weise zu steuern, ergibt sich z.B. bei Fahrzeugen aller Art, bei Robotern, Werkzeugmaschinen oder auch bei der aktiven Dämpfung von Gebäudeschwingungen. Zur theoretischen Lösung dieser Aufgabe braucht man Kenntnisse über das mechanische System, damit man die Methoden der Regelungstheorie erfolgreich anwenden kann. Die praktische Lösung verwendet in zunehmendem Masse Bauelemente der Elektronik. Das Beispiel der berührungsfreien magnetischen Lagerung zeigt diese Anwendung der Regeltechnik in der Mechanik und die damit verbundene «Mechatronik» besonders deutlich.

Die Kräfte zur Lagerung eines Rotors lassen sich elektromagnetisch erzeugen. Der Magnetstrom hängt dabei über einen Regler so vom Bewegungszustand des Rotors ab, dass der Rotor gerade in der Schwebe bleibt. Durch die Art des Reglers kann die Lagerung ganz verschiedenartige dynamische Eigenschaften erhalten.

Anwendungen bei Werkzeugmaschinen und in der Vakuumtechnik werden erläutert, Entwicklungsmöglichkeiten und derzeitige Forschungsarbeiten werden diskutiert.

The problem of controlling the dynamics of a mechanical structure arises for example in the field of vehicles, robots, machine tools or even the active damping of building vibrations. A theoretical solution requires knowledge of the mechanical system in order to successfully apply the methods of control theory. The practical solution increasingly applies electrotechnical elements. The example of the contactless magnetic bearing shows clearly the connection of control techniques and mechanics, extending into the field of «mechatronics».

The forces for supporting a rotor can be generated electro-magnetically. The current through the magnet is controlled by the dynamic state of the rotor so that the rotor keeps its hovering position. The controller can be designed in different ways so that the suspension is adaptable to quite different dynamic requirements.

Applications in the field of machine tools and vacuum techniques are presented, future trends and current research projects are discussed.

## Mechanik und Regelungstechnik

Die Mechanik ist die Wissenschaft von den Kräften und den Bewegungen. Sie gibt Antwort auf eine so übliche Fragestellung wie: Welche Folgen hat eine vorgegebene Bewegung oder Kraft, z.B. welche Bewegung stellt sich ein, wenn auf einen frei beweglichen Körper eine Gewichtskraft wirkt? Die Antwort ergibt sich hier aus einer genauen Untersuchung der Bewegungsgesetze, also aus einer *Analyse*. Nicht ganz so üblich ist die umgekehrte Fragestellung: welche Massnahmen sind zu treffen, damit als Folge davon ganz bestimmte, gewünschte Bewegungen oder Kräfte entstehen? Als Beispiel: In welcher Art

und Weise sind die Bremskräfte eines Autos zu steuern, damit es in möglichst kurzer Zeit abbremst ohne zu schleudern? Die Beantwortung solcher Fragen erfordert ein Zusammenwirken, eine *Synthese verschiedener Disziplinen*, hier vor allem der Mechanik und der Regelungstechnik. Und wenn die so gefundenen Vorschläge dann in die Praxis umgesetzt werden sollen, ist die Realisierung meist nur mit Hilfe der *Elektrotechnik* möglich. Beispiele dazu gibt es vor allem in der *Luft- und Raumfahrt* genügend. Aber auch in der *Fahrzeug- und in der Maschinenindustrie* spielt die Verbindung von Mechanik und Elektrotechnik, die sogenannte «*Mechatronic*», eine immer grössere Rolle.

Als konkretes Beispiel möge das berührungsfreie magnetische Lager dienen. Einer kurzen Beschreibung der Funktion, des Aufbaus und der Eigenschaften

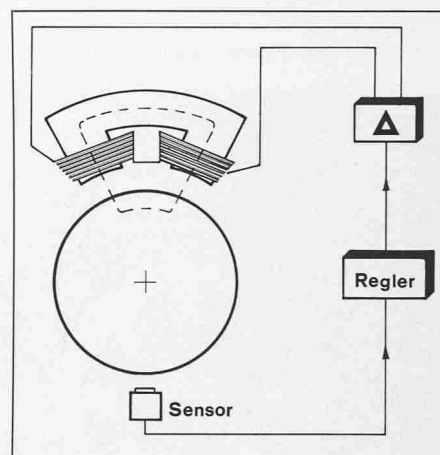


Bild 1. Prinzip der magnetischen Aufhängung

ten des Magnetlagers folgen einige Hinweise auf derzeitige Anwendungen bei *Werkzeugmaschinen* und in der *Vakuumtechnik*. Die anschliessend beschriebenen Forschungsarbeiten am *Institut für Mechanik der ETHZ* befassen sich mit der *Systematisierung des Magnetlagerentwurfs* und der zugehörigen *Regelung* sowie mit der *aktiven Dämpfung von Resonanzschwingungen bei einem elastischen Rotor*:

## Funktion, Aufbau, Eigenschaften

Es sind elektromagnetische Kräfte, welche die Kugel von Bild 1 in der Schwebe halten. Die Kugel selbst ist Teil eines ganzen Regelkreises: ein Sensor misst die Position der Kugel, ein Regler verarbeitet dieses Messsignal zu einem Regelsignal, das über einen Leistungsverstärker den Elektromagneten steuert. Das Regelgesetz hat dafür zu sorgen, dass der Schwebezustand stabil bleibt und die gewünschten dynamischen Eigenschaften aufweist. So lassen sich z.B. die Steifigkeit und die Dämpfung der berührungsfreien Aufhängung in weiten Grenzen einstellen.

Dieses Funktionsprinzip lässt sich auch technisch zum Aufbau einer Lagerung für eine Welle oder einen Rotor nutzen. Ein wesentliches Bauelement in dem für die Lagerung erforderlichen Regelkreis ist der *Elektromagnet zur Erzeugung der axialen und der radialen Lager-*

\* Vgl. Schweizer Ingenieur und Architekt, Heft 51/52: 1117-1121, 1982; Heft 1/2: 2-7, Heft 4: 42-50, 1983; Heft 9: 275-278, 1983

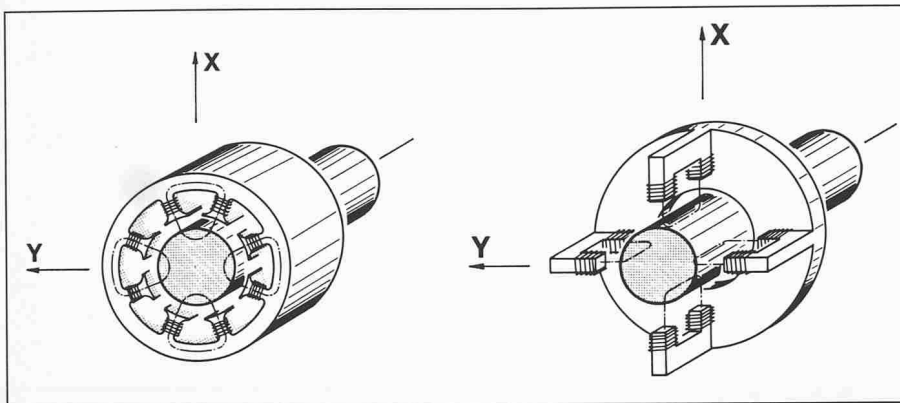


Bild 2. Konfigurationen von radialen Magnetlagern

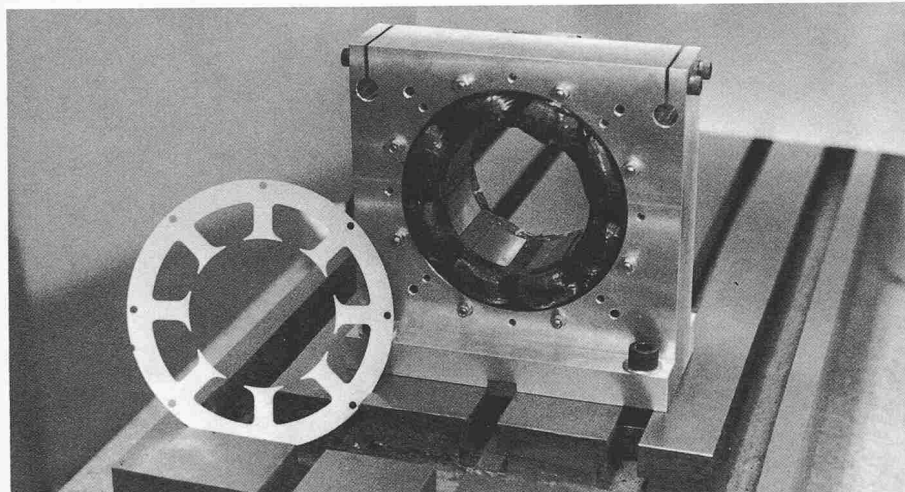
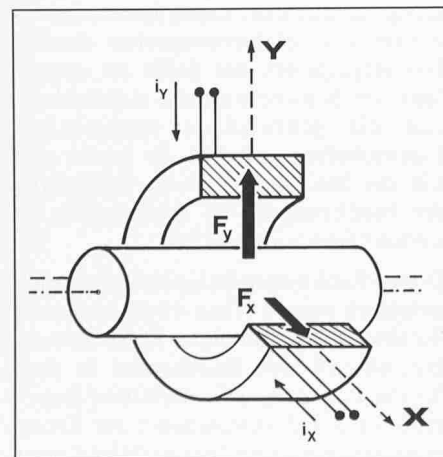


Bild 3. Radial-Magnetlager mit Blechschnitt

kräfte. Bild 2 zeigt zwei verschiedene Konfigurationen für ein radiales Magnetlager. Sie unterscheiden sich im mechanischen Aufbau und dadurch auch darin, welche Richtung der magnetische Fluss in der Welle hat. Während sich das linke Lager derzeit einfacher und kompakter herstellen lässt (Bild 3), weist das rechte Lager die geringeren Ummagnetisierungsverluste auf, wenn sich die Welle dreht. Beide Lager sind so gewickelt, dass sie voneinander unabhängige, radiale Kräfte in der x- und y-Richtung auf die Welle ausüben können.

Bild 4. Magnetlager als Bauelement eines Regelkreises



Um die Eigenschaften des Bauelements «Radiallager» zu beschreiben, betrachtet man am einfachsten seine *Eingang-/Ausgangscharakteristik* (Bild 4). Eingangsgrößen sind die Steuerströme  $i_x, i_y$  für die x- und y-Wicklungen der Lagermagneten. Ausgangsgrößen sind die radialen Lagerkräfte  $F_x$  und  $F_y$ . Natürlich werden die Magnetkräfte auch noch von der Grösse des Luftspaltes zwischen Welle und Magnet, d.h. von der *Rotorauslenkung*  $x, y$  abhängen. Eine geeignete Wicklung führt auf einen linearen Zusammenhang zwischen diesen Grössen [1]:

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_s & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_i & 0 \\ 0 & k_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix}$$

Es gibt auch Wicklungsarten, die einen anderen, nichtlinearen Zusammenhang ergeben und dann entsprechende Linearisierungsnetzwerke erfordern, wenn der gesamte Regelkreis mit Hilfe der linearen Regelungstheorie ausgelegt werden soll. Auf jeden Fall ist jetzt dafür zu sorgen, dass der Steuerstrom  $i_x, i_y$  über ein Regelgesetz so vom Rotorzustand – den Auslenkungen  $x, y$  und den Geschwindigkeiten  $\dot{x}, \dot{y}$  – abhängt, dass die Magnetkraft  $F_x, F_y$  fesselnd und dämpfend auf den Rotor wirkt.

Die Eigenschaften der gesamten Lagerung hängen damit zum einen von den *Belastungsmöglichkeiten* der einzelnen Bauelemente ab (magnetische Sättigung beim Magneten, Leistungsgrenze des Verstärkers) und zum andern von der *Art des Regelgesetzes*. Typische Kennwerte eines Lagers für einen Rotor mit etwa 1000 kg Masse, einem Lagerzapfen mit 150 mm Durchmesser und 200 mm Breite und einer Drehzahl von 10 000 U/min sind: maximale Traglast 12 kN bei einer spezifischen Traglast von 40 N/cm<sup>2</sup>, Luftspalt 0,8 mm, frequenzabhängige dynamische Steifigkeit 400–2000 N/μm, Leistungsverbrauch etwa 1 kW.

Die *Steifigkeit* des elektromagnetischen Lagers kann vor allem bei langsam veränderlicher Last und bei Verwendung einer integrierenden Rückführung sehr gross sein. Die *verschiedenen Arten der Regelung* ermöglichen technisch interessante Anwendungen. So kann z.B. der Rotor um seine Trägheitshauptachse drehen: es treten dann keine Unwuchtkräfte und damit keine Rüttelkräfte im Lager mehr auf. Die Drehachse kann innerhalb des Luftspaltes während des Betriebes geändert werden. Weitere Vorteile sind die praktische Wartungsfreiheit des Lagers und sein geringer Energieverbrauch, der um den Faktor 10 bis 20 unter dem konventioneller Gleit- und Wälzlager liegt. Untersuchungen zur Bestimmung der beim Magnetlager auftretenden Ummagnetisierungs- und Wirbelstromverluste sind im Gange.

Die derzeitigen Nachteile des Lagers hängen mit der Komplexität seines Aufbaus zusammen, vor allem die noch hohen Beschaffungskosten. Auch die Frage der Zuverlässigkeit und der Notlaufeigenschaften – selbst wenn solche Lager schon die Abnahmebedingungen für Raumfahrtanwendungen erfüllt haben – bedarf weiterer Klärungen.

## Anwendungen

Magnetlager werden für spezielle physikalische Anwendungen schon lange verwendet. So gelang es bereits vor über 30 Jahren, kleine magnetisch aufgehängte Eisenkugeln auf Drehzahlen von 300 kHz zu bringen, bevor sie bei Fliehbeschleunigungen von 10<sup>8</sup> g zerbarsten. Relativ neu sind dagegen industrielle Anwendungen [2], z.B. bei Werkzeugmaschinen und in der Verfahrens- und in der Vakuumtechnik.

Eine *Drehmaschine zum Feinstdrehen grosser Druckzylinder* für die graphische Industrie verwendet eine Magnet-

lagerung für das Werkstück. Die schwingungsgedämpfte Aufhängung erlaubt ein Hochgeschwindigkeitsdrehen mit einer Oberflächengüte von 0,2 µm und erspart früher erforderliche zusätzliche Arbeitsgänge.

Das *Hochgeschwindigkeitsfräsen mit Schnittgeschwindigkeiten* von über 5000 m/min für Aluminium ist derzeit in der Erprobungsphase [3]. Die magnetgelagerte Spindel dreht bis zu 35 000 U/min, die Zerspanungsleistung an der Schneide beträgt 20 kW. Die neuartige Spindellagerung erfordert und erlaubt eine steife und massive Spindelausführung. Die hohen Vorschubgeschwindigkeiten von 8 m/min verlangen spezielle Vorschubsteuerungen.

Für die *Verfahrens-* und für die *Vakuumtechnik* ist die berührungs- und schmiermittelfreie Magnetlagerung von besonderem Interesse. So dienen z.B. Magnetlager dazu, Stahlrohre, die in einem Heissraum mit Kunststoffpulver beschichtet wurden, berührungsfrei durch einen anschliessenden Aushärtbereich zu führen [4]. Die bisher unvermeidlichen Kontaktstellen und Qualitätseinbußen wurden damit vermieden.

In der Vakuumtechnik ist die Magnetlagerung einer *Turbomolekularpumpe* eine der ersten industriellen Anwendungen [2]. Bei einer extrem schwingungsarmen Lagerung – die Schwinggeschwindigkeit am Pumpenkörper ist < 0,05 mm/s – und einer Nenndrehzahl von 500 Hz wird ein kohlenwasserstoffreiches Ultrahochvakuum von < 10<sup>-10</sup> mbar erreicht.

Das Institut für Mechanik der ETHZ hat zusammen mit dem *Max-Planck-Institut für Festkörperforschung* (Dr. E. Bauser) eine magnetisch gelagerte *Epitaxie-Zentrifuge* gebaut (Bild 5). Hier werden im Fliehkraftfeld auf definierte Weise dünnste Schichten auf geeigneten Substraten aufgebracht. Für diese Versuche zur *Halbleiterherstellung* sind *Hochvakuumbedingungen* erforderlich.

Der den Epitaxietiegel tragende Rotor dreht berührungsfrei in einem Vakuumgehäuse. Die Magnetlager und die Antriebswicklung befinden sich ausserhalb des Gehäuses. Der Bau dieser Zentrifuge erfolgte im Rahmen von Forschungsarbeiten über Magnetlager, über die im folgenden kurz berichtet wird.

### Forschungsarbeiten über Magnetlager an der ETHZ

Eine Untersuchung (A. Traxler) befasst sich mit der *Systematisierung des Lagerentwurfs*. Dazu gehört vor allem die theoretische und messtechnische Erfassung von massgebenden Kennwerten der einzelnen Elemente im Regelkreis, vor allem natürlich für die Lagermagnete. Ziel ist es, eine Aussage zu machen über den Zusammenhang zwischen der Steuerspannung bzw. dem Steuerstrom an dem Elektromagneten und der dadurch erzeugten Lagerkraft. Es sind elektromagnetische und geometrische Grössen, die diesen Zusammenhang beeinflussen, wie die Art der Wicklung, die Magnetisierungskennlinien verschiedener Bleche, die Lagerabmessungen und die Geometrie des Luftspalts und der feldführenden Eisenteile am Magneten und am Rotor. Zur direkten Messung der Lagerkräfte dient ein Mehrkomponenten-Dynamometer; eine indirekte Bestimmung, eine Identifizierung erfolgt auch am schwebenden, rotierenden Rotor. Ein zu diesem Zweck gebauter Versuchsstand (Bild 6) dient gleichzeitig zur Erprobung verschiedener Regelkonzepte.

Die Untersuchung der *Regelung* (H. Bleuler) geht von dem Blockschaltbild, Bild 7, für das Rotor-Lager-System aus. Die Rotorbewegung  $x$  wird durch ein System linearer Differentialgleichungen 1. Ordnung, die Zustandsgleichung, modelliert. Die gemessenen Rotorauslenkungen  $y$  allein reichen zum Aufbau

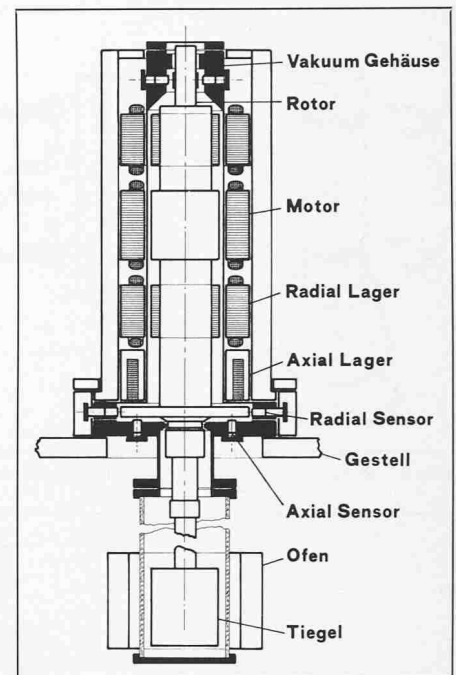


Bild 5. Im Vakuum magnetisch gelagerte Epitaxie-Zentrifuge

eines brauchbaren Regelsignales noch nicht aus. Dazu sind noch Informationen über die Geschwindigkeit der Rotorbewegung erforderlich. Sie lassen sich durch zeitliches Differenzieren der Auslenkungssignale oder mit Hilfe eines Beobachters, einer Schätzung  $\hat{x}$  aufgrund der Messwerte und der Modellvorstellung, beschaffen.

Bei einer vollständigen Zustandsrückführung verarbeitet der Regler sämtliche Zustandsgrössen, Auslenkungen und Geschwindigkeiten, und leitet daraus die Steuersignale für die Magnete ab. Betrachtet man nur die radiale Lagerung eines Rotors (Bild 8), so verknüpft der lineare Regler bei dieser vollständigen Zustandsrückführung die acht Eingangsgrössen mit vier Steuergrössen durch im allgemeinen 32 Verstärkungskoeffizienten. In vielen Anwendungen genügt jedoch eine einfachere, dezentrale Regelung, wo jedes Lager für sich alleine arbeitet, und wo dann nur noch acht, bzw. unter Ausnüt-

Bild 6. Versuchsstand mit magnetgelagertem Rotor

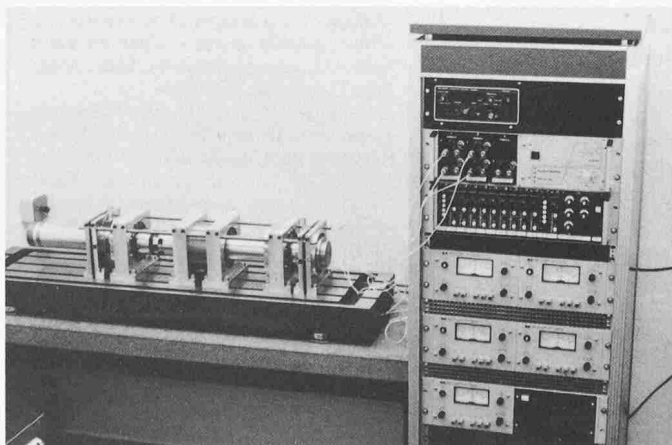
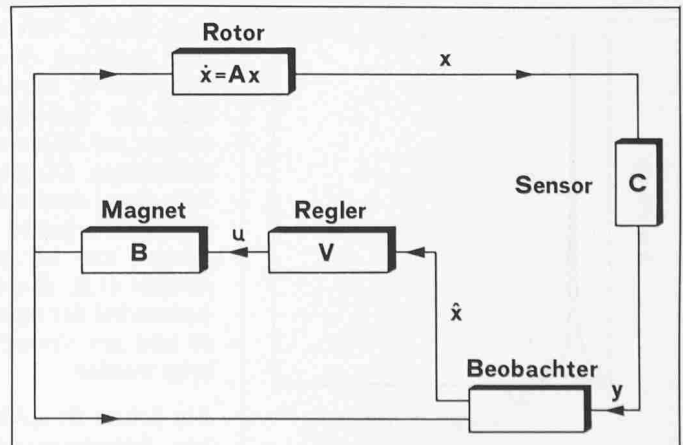


Bild 7. Regelkreis für die magnetische Lagerung





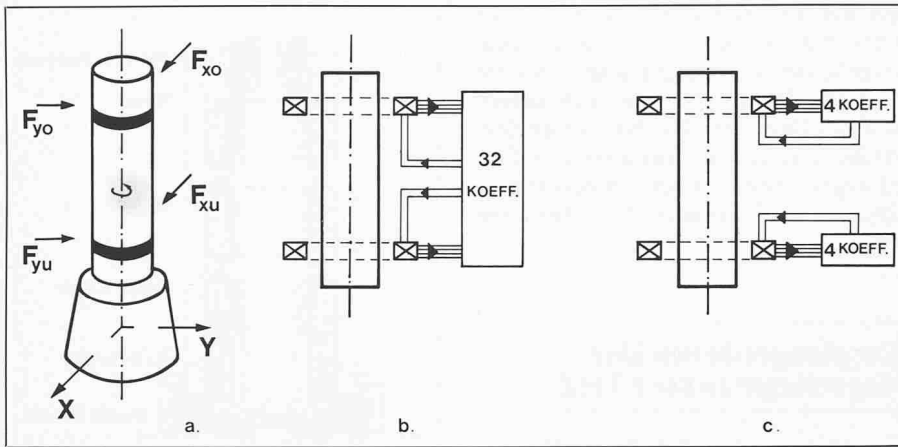


Bild 8. Radiale Rotorlagerung. a) mit zwei verschiedenen Regelkonzepten b) zentral c) dezentral

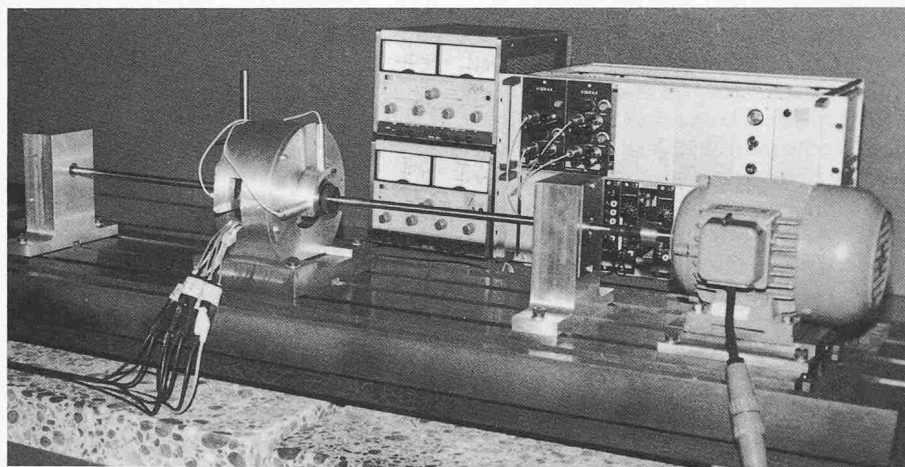
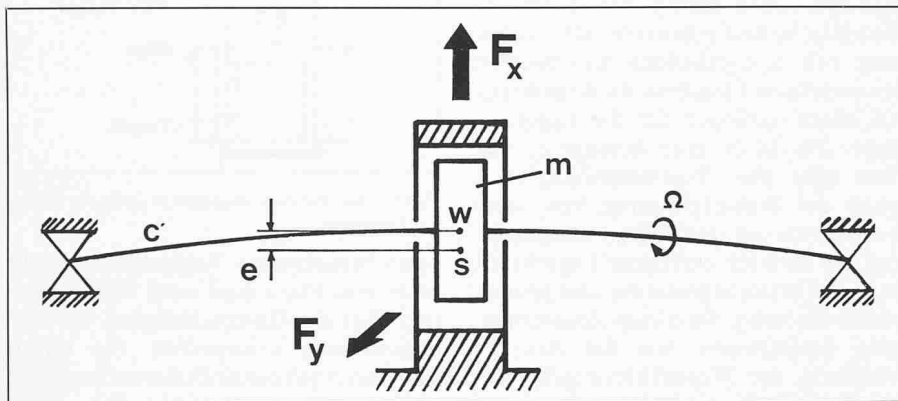
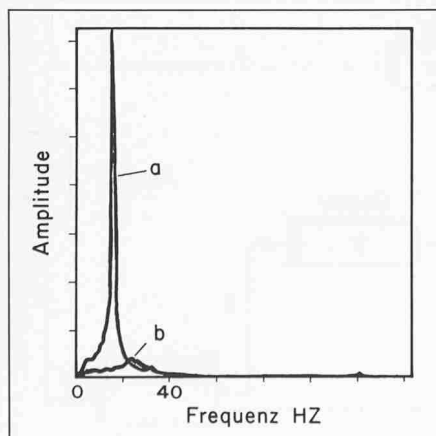


Bild 9. Elastischer Rotor mit berührungsfreiem magnetischem Dämpfer. Oben: Prinzip. Unten: Laborversuch

Bild 10. Resonanzkurven. a) ohne Dämpfer b) mit berührungsfreiem, aktivem Dämpfer



zung von Symmetrien nur noch vier Verstärkungskoeffizienten einzustellen sind. Diese Vereinfachungen erleichtern natürlich den Aufbau der Lagerung und sie werden auch die Umstellung der bisherigen analogen Schaltungen auf Mikroprozessorschaltungen erleichtern. Die praktische Brauchbarkeit dieses dezentralen Regelkonzeptes [5], sein Verhalten bei Parameteränderungen und bei Steuergrößenbegrenzungen (z.B. durch Sättigungseffekte) konnte bei der Epitaxiezentrifuge (Bild 5) und am Versuchsstand (Bild 6) gezeigt werden.

Ein drittes Beispiel für die gegenwärtigen Forschungsarbeiten befasst sich

mit der Möglichkeit, die Schwingungen von elastischen Strukturen berührungsfrei zu steuern (J. Salm). Die Biegeschwingungen  $x(t)$ ,  $y(t)$  der Lavalwelle von Bild 9 werden im einfachsten Fall beschrieben durch die Bewegungsgleichungen

$$m\ddot{x} + cx = m\epsilon\Omega^2 \cos\Omega t + F_x$$

$$m\ddot{y} + cy = m\epsilon\Omega^2 \sin\Omega t + F_y$$

Auf der rechten Seite dieser Gleichungen stehen neben den Anregungskräften durch Unwucht noch die Kräfte  $F_x$ ,  $F_y$ , die ein Magnetlager auf den Rotor ausübt. Bekanntlich treten infolge der Unwuchtanregung Resonanzschwingungen auf, wenn die Drehzahl  $\Omega$  im Bereich der Biegeeigenfrequenz  $\omega = \sqrt{c/m}$  liegt. Die grossen Resonanzamplituden bei dieser kritischen Drehzahl lassen sich nun vermeiden, wenn der aktive Dämpfer, das entsprechend angesteuerte Magnetlager, geeignete Kräfte auf den Rotor ausübt. Bild 9b zeigt einen solchen Versuchsstand; erkennbar ist das Magnetlager, das den Rotor berührungsfrei umschliesst; im Hintergrund sind die Regler und Verstärker zu sehen. Erste Versuche zeigten gute Ergebnisse: die Resonanzamplitude (Bild 10) konnte z.B. um den Faktor 35 gesenkt werden, ohne die Resonanzfrequenz wesentlich zu verschieben. Das Lager übte also in diesem Frequenzbereich praktisch nur Dämpfungskräfte aus.

Auch wenn noch eine ganze Reihe, zum Teil auch grundsätzlicher Fragen zu klären sind, so ist doch die Anwendbarkeit der Magnetlager bereits nachgewiesen und ihr möglicher Nutzen ist zu erkennen. Sie werden den Bereich der klassischen Maschinendynamik erweitern und Lösungen erlauben, die mit konventionellen Lagern bisher kaum oder nicht möglich waren.

**Literaturverzeichnis**

- [1] Schweitzer, G. und R. Lange (1976): «Characteristics of a magnetic rotor bearing for active vibration control». Conf. on Vibrations in Rotating Machinery, Instn. Mech. Eng., Cambridge, C 239/76
- [2] Habermann, H. et G. Liard: «Paliers magnétiques actifs dans les turbo-machines». Revue des Roulements SKF, No. 195
- [3] Arnold, W., Scherer, J. und H. Schulz (1982): «Hochgeschwindigkeitsfräsen wird serienreif». VDI-Nachrichten Nr. 49, S. 10/11
- [4] Weh, H. (1982): «Kontinuierliche Oberflächenbehandlung im Magnetfeld». Neue Technik 11/12, S. 41
- [5] Senning, M. F. (1979): «Feasibly Decentralized Control». Prom. ETHZ

Adresse des Verfassers: Prof. Dr. G. Schweitzer, Institut für Mechanik, ETH-Zentrum, 8092 Zürich.